

## Комплексна навігаційна система машинно-тракторного агрегату для технологій точного землеробства

Проаналізовані можливості застосування комплексних (багатокомпонентних) навігаційних систем машинно-тракторних агрегатів для виконання операцій високоточного дозування технологічних матеріалів у системі точного землеробства.

**комплексна навігаційна система, машинно-тракторні агрегати, високоточне дозування, матеріали, землеробство**

При внесенні технологічних матеріалів (ТМ) – насіння (при сівбі), добрив, пестицидів тощо – в технологіях точного землеробства (ТЗ) необхідно виконувати операції високоточного дозування ТМ, а також забезпечувати високу просторову точність доставки ТМ в задану точку поля. Оцінка кінематичних параметрів робочого руху машинно-тракторного агрегату (МТА) при цьому є одним з визначальних впливових факторів формування заданого закону розподілу ТМ по площі поля.

На сьогодні існують широкі технічні можливості для визначення параметрів руху МТА при їх роботі за технологіями ТЗ. Наприклад, якщо застосовується супутникова глобальна система позиціонування (ГСП), то з'являється можливість користуватися інформацією не тільки про координати місцезнаходження МТА в полі, але і про швидкість його руху [1-2]. Деякі приймачі ГСП (з субметровою точністю позиціонування) можуть дати, наприклад, точність визначення швидкості МТА в межах  $\pm 0.1-0.2$  м/с. Проте, практика застосування обладнання ГСП на сільськогосподарських рухомих об'єктах свідчить, що досить часто виникає ситуація з втратою сигналів з навігаційних супутників. Пов'язано це з багатьма факторами, але основними з них є непередбачені атмосферні явища, викривлення радіосигналів за умов прийому відбитих променів, а також попадання МТА разом з приймальною антеною в зони "радіотіней" від ліній електропередач, лісосмуг тощо. Втрата інформації, наприклад, про швидкість переміщення МТА може привести до зміни заданої щільності внесення ТМ в недозволених межах. Тому досить широко використовується практика визначення швидкості руху МТА та інших кінематичних параметрів шляхом установки на мостах ведучих (ведених) коліс МТА відповідних датчиків. Недоліками такого вимірювання кінематичних параметрів руху МТА є такі фактори, як зміна радіусу кочення колеса під час роботи машини, пробуксовка, ковзання коліс по поверхні ґрунту, змінний режим роботи агрегатів тощо. Нерідко для визначення швидкості руху МТА використовуються, також, сенсори радарного типу з оптичним або ультразвуковим діапазоном використання. Але точність роботи навіть добре відкаліброваного радарного сенсора великою мірою залежить від кількості і стану решток на поверхні поля і стану самої поверхні, що є обмежуючим моментом в застосуванні подібних приладів. Наприклад, сенсор RSS (Raven Industries, США) має діапазон вимірювань від 0,22 до 31,1 м/с і похибку вимірювань близько 3 % при роботі на рівній ущільненій поверхні. Проте, при роботі в реальних умовах якість роботи датчика різко погіршується. Крім того, показник точності місцевизначення МТА за допомогою ГСП

залежить від рівня застосованого в конструкції датчика технологічних рішень, а останнє впливає на вартість системи позиціонування. Саме ціна часто стає обмежувальним фактором для використання високоточних систем при виконанні операцій навігації сільськогосподарських рухомих об'єктів (рис. 1).

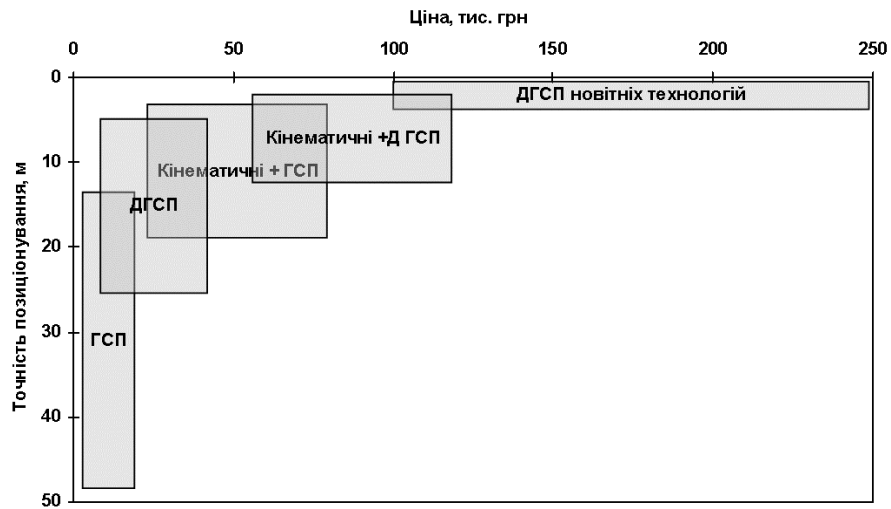


Рисунок 1 – Зв'язок вартості навігаційного обладнання та показників точності його роботи

Електромеханічні інерційні датчики застосовуються на протязі близько 50 років і на сучасному етапі сягнули високого рівня досконалості технологічного процесу їх виготовлення, що значно покращує перспективи їх застосування в механізованому рослинництві за умов поліпшення співвідношення "ціна/точність". Але поступово на зміну їм приходять інерціальні датчики новітніх технологічних рішень, наприклад, кільцеві лазерні гіроскопи, інтерферометричні волоконно-оптичні гіроскопи, кварцові коріолісові датчики тощо. В результаті цього, на сьогодні, наприклад, існують датчики об'ємом близько 5 см<sup>3</sup>, які в своєму моноблочному тілі несуть багатоосову механічну систему, а також електронну частину. Вартість таких датчиків складає долі відсотка від загальної вартості, наприклад, "середньостатистичного" посівного агрегату.

Зважаючи на цінові межі застосування складного (а тому вартісного) обладнання в сільському господарстві, а також на рівень задач, що окреслені вище, розглянемо перспективний напрямок застосування приладів навігації для технологій ТЗ – інтеграцію різних за способом роботи навігаційних систем в одну комплексну.

Метою досліджень є досягнення ефективного рівня використання технічних можливостей сучасних навігаційних систем, а також складання методики розробки нових програмно-апаратних комплексів визначення з високою точністю координат МТА в полі. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити ряд задач. Основними з таких задач є побудова раціональної моделі руху МТА в полі, розробка методики та алгоритму обробки вимірювальної інформації, що надходить від спеціалізованого обладнання, а також розробка методики аналізу потенційних можливостей як простих (однокомпонентних), так і комплексних (багатокомпонентних) навігаційних систем.

В загальному, при виконанні механізованих технологічних операцій з високою (субметровою) просторовою точністю необхідно мати високоточну інформацію про кінематичні параметри руху МТА. Для цього треба провести обґрунтування складу систем навігаційного обладнання.

Для вирішення головної задачі - виконання польових робіт в рослинництві з високою просторовою точністю - запропонована комплексна навігаційна система, що складається з диференціальної глобальної системи позиціонування (ДГСП),

інерціальної навігаційної (ІН) та курсо-швидкісної (КШ) підсистем. В якості основної навігаційної системи обрано ГСП, а в якості додаткових засобів обчислення координат місцезнаходження МТА в полі використані інерційні датчики кутового переміщення та коливання, а також датчики шляхової швидкості і кута курсу. Передбачається, що сумісна робота ІН підсистеми разом з ДГСП дозволить підвищити частоту оновлення навігаційної інформації (до десятків герц) і сприятиме згладжуванню випадкових помилок ДГСП, а також допоможе зберегти безперервність роботи обладнання для технологій ЗНВ ТМ в моменти короточасних зникнень сигналу від ГСП (ДГСП).

З наведених міркувань на рис. 2 подана схема комплексного навігаційного обладнання МТА.

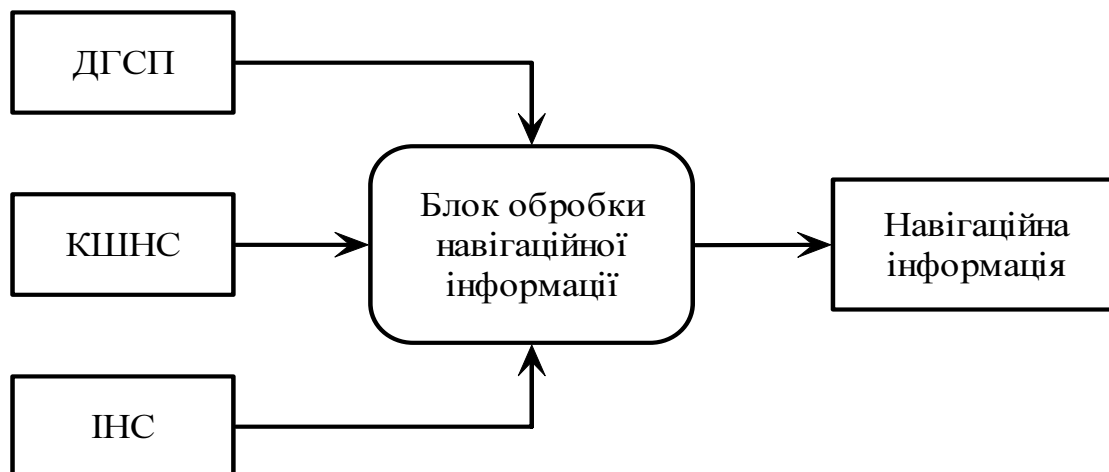


Рисунок 2 – Склад комплексного навігаційного обладнання МТА

Інтеграція підсистем необхідна для забезпечення високої ефективності роботи систем змінних норм внесення (ЗНВ) ТМ на підвищених робочих швидкостях широкозахватних МТА і покращення показників надійності функціонування машин в умовах порушення роботи будь-якої з означених підсистем. Задача аналізу процесу функціонування запропонованої комплексної системи зводиться до пошуку найкращих оцінок кінематичного режиму руху МТА за умов наявності надлишкової інформації при дії на комплекс систематичних, випадкових та шумових складових збурень і при забезпеченні обраного рівня усталеності заданого кінематичного режиму роботи МТА та при умові ідентифікації відмов підсистем і системи в цілому. В даному випадку маємо систему з надлишковою інформативністю, за рахунок якої, в першу чергу, можливо підвищити точність обчислення координат МТА в полі і зберегти працездатність системи в цілому при виході з ладу однієї з навігаційних підсистем.

Критеріями оптимізації виступають задані показники точності та достовірності вихідної навігаційної інформації про параметри руху МТА відносно заданої системи координат. Одним з таких показників служить показник середньоквадратичного відхилення обчислених координат МТА від заданих.

Для аналізу узагальненої картини фактичного руху МТА при реалізації заданого технологічного процесу, а також моделі еволюції погрішностей навігаційного комплексу, розглянемо поле  $\Pi$  (рис. 3) в межах опорних координатних осей (базису). В якості опорного координатного базису вводиться прямокутна горизонтальна система  $O_1R_{1B}R_{2B}$  з центром в точці  $O_1$ , наприклад, в точці, де розташована приймально-передавальна антена станції диференційного сигналу.

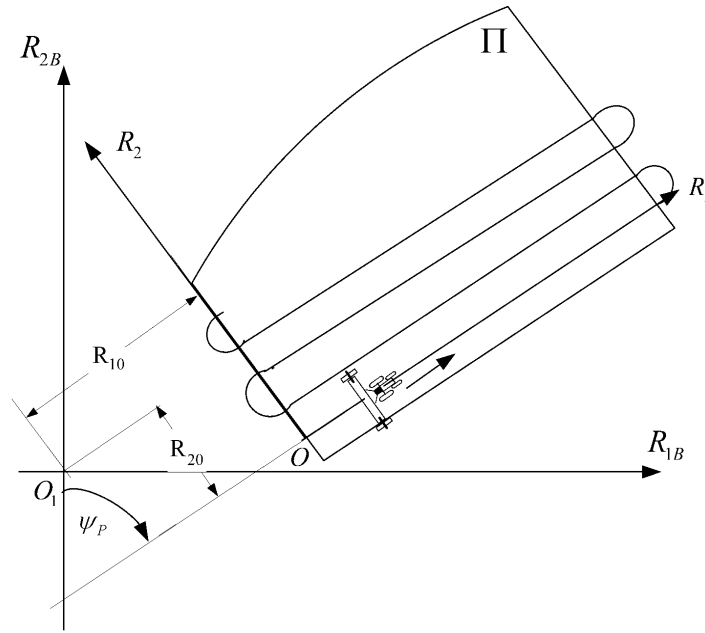


Рисунок 3 – Система координат до визначення кінематичних параметрів руху МТА по полю

Рух МТА відносно системи  $O_1R_{1B}R_{2B}$  можливо описати за допомогою поточних значень координат  $R_{1B}(t)$  та  $R_{2B}(t)$ , складових швидкості  $V_{1B}(t)$  та  $V_{2B}(t)$ , складових прискорення  $a_{1B}(t)$  та  $a_{2B}(t)$  центру приймальної антени ДГСП бортового навігаційного комплексу МТА, а також кута курсу  $\psi(t)$  та кутової швидкості випадкових змін  $\Delta\omega_b(t)$  кута курсу МТА. Окрім координатного базису  $O_1R_{1B}R_{2B}$  введена локальна горизонтальна система координат  $OR_1R_2$  з центром  $O$ , що розташований, наприклад, на початку першого технологічного проходу МТА.

Перший прохід МТА проводиться, як правило, по вішках (тарувальний прохід), а напрямок вісі  $R_1$  співпадає з напрямком першого проходу. Під час виконання першого проходу (це не обов'язково пряма лінія) відбувається фіксація моментів проходу контрольних точок, що необхідно для тарування елементів бортового обладнання і визначення рівня погрешностей їх роботи.

Площини координатних систем  $O_1R_{1B}R_{2B}$  та  $OR_1R_2$  співпадають між собою і в межах площі поля  $\Pi$  кривизною земної поверхні зневажаємо, з огляду надмалого їх впливу. Положення та орієнтація локальної системи координат  $OR_1R_2$  відносно опорної системи  $O_1R_{1B}R_{2B}$  характеризується параметрами  $R_{10}$  та  $R_{20}$  і кутом  $\psi_p$ .

Вектор-стовпець параметрів, що оцінюються, має вигляд:

$$\bar{X} = (R_{1B}, R_{2B}, V_{1B}, V_{2B}, a_{1B}, a_{2B}, \psi, \Delta\omega, \Delta R_{1B}, \Delta R_{2B}, \Delta V_{1B}, \Delta V_{2B}, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \Delta a_1, \Delta a_2, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \Delta R_{1CS}, \Delta R_{2CS}, \delta_V, \Delta\psi, R_{10}, R_{20}, \Delta\psi_p)^T, \quad (1)$$

де  $R_{1B}, R_{2B}, V_{1B}, V_{2B}, a_{1B}, a_{2B}, \psi, \Delta\omega$  - параметри, що характеризують рух МТА відносно опорного координатного базису;

$\Delta R_{1B}, \Delta R_{2B}, \Delta V_{1B}, \Delta V_{2B}$  - систематичні погрешності ІН підсистеми в визначенні координат та складових швидкості МТА;

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$  - систематичні погрешності ІН підсистеми в визначенні орієнтації базового тригранника  $OX_1X_2X_3$ , що пов'язаний з остовом МТА;

$\Delta a_1, \Delta a_2$  - систематичні погрешності поздовжнього та бокового акселерометрів ІН підсистеми;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  - систематичні складові погрішностей кутової швидкості опорного тригранника відносно його осей  $OX_1X_2X_3$ ;

$\Delta R_{1CS}, \Delta R_{2CS}$  - систематичні погрішності КШ підсистеми в визначенні координат МТА;

$\delta_V$  - систематична погрішність масштабного коефіцієнту датчика шляхової швидкості КШ підсистеми;

$\Delta\psi$  - систематична похибка вимірювача курсу КШ підсистеми;

$R_{10}, R_{20}$  - координати центру  $O$  локальної системи координат відносно базової системи координат  $O_1R_{1B}R_{2B}$ ;

$\Delta\psi_p$  - погрішність початкової оцінки азимутального кута  $\psi_p$  першого проходу агрегату.

Модель еволюції вектора параметрів, що оцінюються, запишеться у вигляді:

$$\bar{X}_{i+1} = \Phi_i \bar{X}_i + \bar{U}_{Xi} + \bar{\xi}_i, \quad (2)$$

де  $\Phi_i = E_{27} + F_i \Delta t$  - перехідна матриця;

$E_{27}$  - одинична матриця, розмірності  $27 \times 27$ ;

$F_i$  - матриця, розмірності  $27 \times 27$  з заданими ненульовими елементами  $f_{ij}$ , які є функціями оцінок поточних значень кінематичних параметрів руху МТА;

$\Delta t$  - крок дискретизації моделі по часу;

$\bar{U}_{Xi}$  - вектор-стовпець з ненульовою, сьомою, компонентою  $\psi$  виду  $\omega_T \Delta t$ ;

$\omega_T$  - програмна кутова швидкість руху МТА по курсу на поворотних смугах;

$\bar{\xi}_i$  - вектор-стовпець випадкових збурень із заданою коваріаційною матрицею

$Q$ .

Для приведення моделі оцінювання вектора стану до стандартної форми задачі лінійної фільтрації, модель еволюції вектору стану доповнена алгебраїчними рівняннями спостережень. Ці рівняння для кожної з навігаційних підсистем МТА мають форму:

$$\bar{Y}_{Li} = H_{Li} \bar{X}_i + \bar{\eta}_{Li}, \quad (3)$$

( $L = 1, 2, 3, 4$ )

де  $\bar{Y}_{Li}$  - вектор-стовпець розмірності  $m_L$ ; ( $m_1 = 4, m_2 = 8, m_3 = 5, m_4 = 2$ );

$\bar{\eta}_{Li} = (\eta_{1i}, \eta_{2i}, \eta_{3i}, \eta_{4i})^T$  - вектор-стовпець незалежних випадкових похибок спостережень з коваріаційною матрицею  $R_L$ ;

$H_{Li}$  - задані матриці;

Знайдені рівняння спостережень для ДГСП, ІН та КШ підсистем дозволили знайти об'єднане рівняння спостережень і виконати пошук оптимальних оцінок вектору стану  $\bar{X}_i$  дискретної системи (2). При цьому використано модифікований алгоритм фільтру Калмана, так званого "розщепленого" типу з послідовною скалярною обробкою компонент вектору спостережень на кожному кроці фіксації спостережень.

Для оперативної ідентифікації відмов навігаційної системи застосована процедура перевірки працездатності кожної з навігаційних підсистем  $L$  шляхом аналізу співвідношення:

$$\rho_{iL} < \nu m_L, \quad (4)$$

де  $\nu$  - заданий коефіцієнт запасу надійності ( $\nu > 1$ );

$$\rho_{iL} = \Delta \bar{Y}_{Li}^T B_{Li}^+ \Delta \bar{Y}_{Li}; \quad B_{Li} = H_{Li} P_i H_{Li}^T + R_{Li}; \quad \Delta \bar{Y}_{Li} = \bar{Y}_{Li} - H_{Li} \hat{\bar{X}}_i;$$

$P_i$  - коваріаційна матриця помилок оцінки вектору стану  $\bar{X}$ ;

$i$  - номер кроку дискретизації;

"+" – символ операції псевдообернення матриці.

Таким чином, якщо в процесі функціонування навігаційного обладнання МТА буде з'ясовано, що умова (4) не виконується, то відповідна підсистема вважається такою, що відмовила, і її підвектор спостережень з процедури циклічної обробки даних виключається.

Для перевірки працездатності алгоритму комплексної обробки навігаційної інформації про рух МТА проведене імітаційне математичне моделювання. Моделювання роботи навігаційного комплексу МТА проводилось за методикою, що у вигляді структурної схеми взаємодії моделей окремих навігаційних підсистем, представлена на рис. 4.

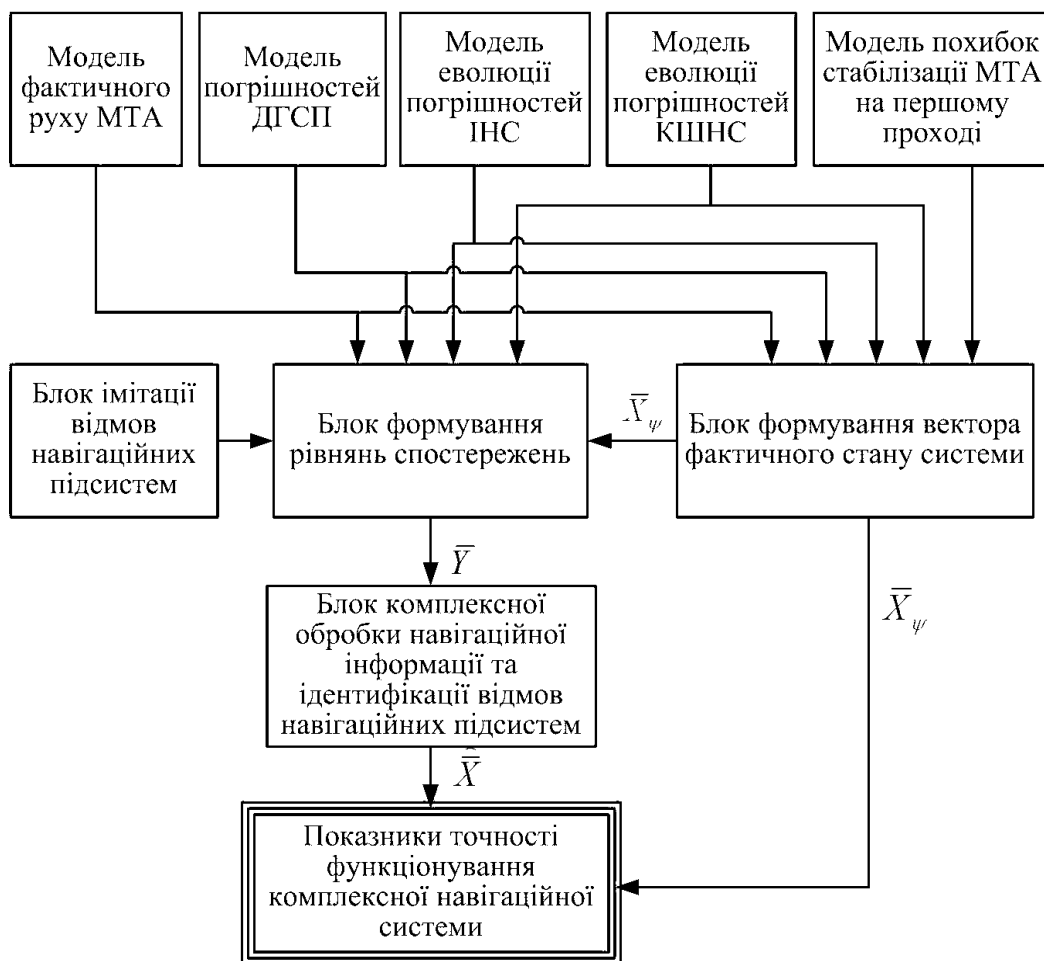


Рисунок 4 – Структурна схема моделювання роботи інтегрованого навігаційного комплексу МТА

В результаті проведення моделювання, отримано цінну інформацію про поведінку комплексу взагалі і окремих підсистем зокрема.

Наприклад, на рисунку 5 показані графіки траєкторії дійсного руху МТА та розрахованих навігаційним комплексом координат МТА при значеннях параметрів:  $\lambda=0.7$  рад/с,  $\mu=0.15$ ,  $\sigma_B=0.04$  м,  $\lambda_c=0.8$  рад/с,  $\mu_c=0.2$ .

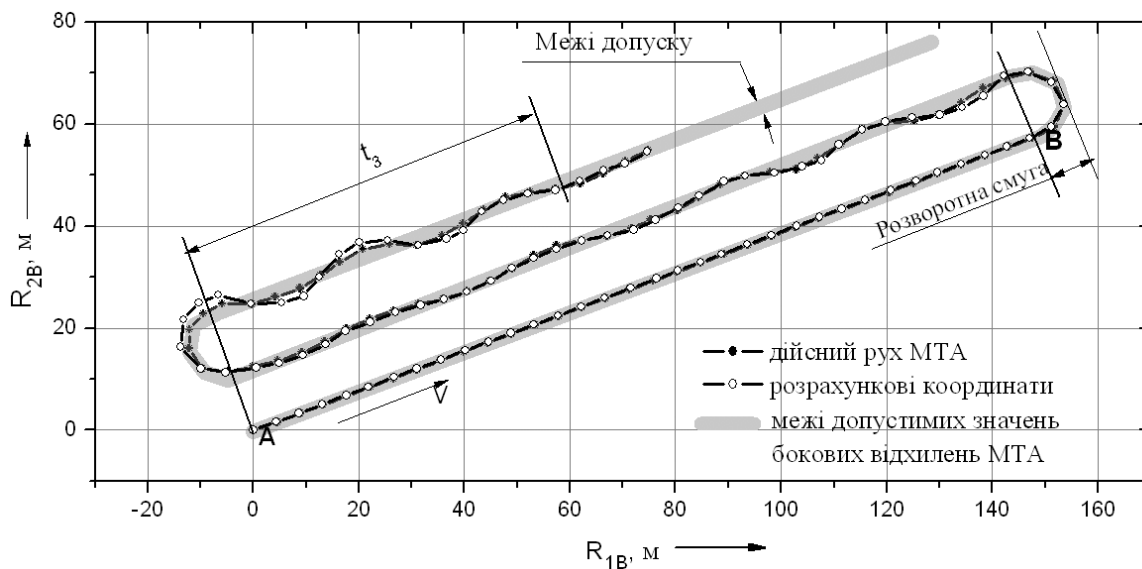


Рисунок 5 – Розрахункові координати траєкторії руху МТА при  $\lambda=0.7$  рад/с,  $\mu=0.15$ ,  $\sigma_{B1}=0.04$  м,  $\lambda_c=0.8$  рад/с,  $\mu_c=0.2$ , (варіант А)

Рух МТА починається з точки А в напрямку швидкості  $V$  по першому (тарувальному) проходу (лінія АВ). Після цього на поворотній смузі відбувається перший розворот. З графіка видно, що після виконання розворотів починаються коливальні процеси в розрахунках координат руху МТА на протязі близько 17 секунд, після чого настає стабілізація розрахунку координат (означимо цей варіант комбінації величин параметрів комплексної навігаційної системи, як варіант А).

На графіку (рис. 5) показані також межі допустимих значень відхилення траєкторії руху МТА від заданих осьових ліній проходу МТА. У даному випадку ширина смуги допустимих значень бокових відхилень МТА від заданих осьових ліній складає  $\pm 0.4$  метри. При розрахунку дійсної траєкторії руху МТА закладений такий алгоритм поведінки МТА (центру приймальної антени ГСП), що коли розрахункові координати центру антени ГСП знаходяться в межах допустимих значень відхилення траєкторії руху, то МТА "керується" інформацією комплексної навігаційної системи і "відслідковує" значення розрахункових координат по показникам директорного (направляючого) приладу. У випадках, коли значення розрахункових координат виходять за межі допустимих значень бокових відхилень траєкторії руху МТА від заданих осьових ліній робочих проходів, МТА спрямовується по граничних координатах допустимих значень. Тобто, керування МТА відбувається, наприклад, по маркеру. Керування МТА по показникам директорного приладу відновлюється тоді, коли розрахункові координати, що надходять від навігаційного комплексу, входять в зону допустимих значень бокових відхилень траєкторії руху МТА.

У відповідності до закладених в модель можливостей проводити аналіз працездатності та якості роботи навігаційного комплексу при різних умовах його функціонування, є можливість проводити імітацію порушень роботи навігаційних підсистем шляхом примусового збільшення помилок в роботі тієї або іншої з підсистем і аналізу значень компонент вектору спостережень.

Алгоритм керування режимами роботи навігаційного комплексу обумовлений циклограмою підключення та імітації відмов підсистем навігаційного комплексу. Принципи організації циклограми роботи комплексної навігаційної системи пояснюються рисунком 6.

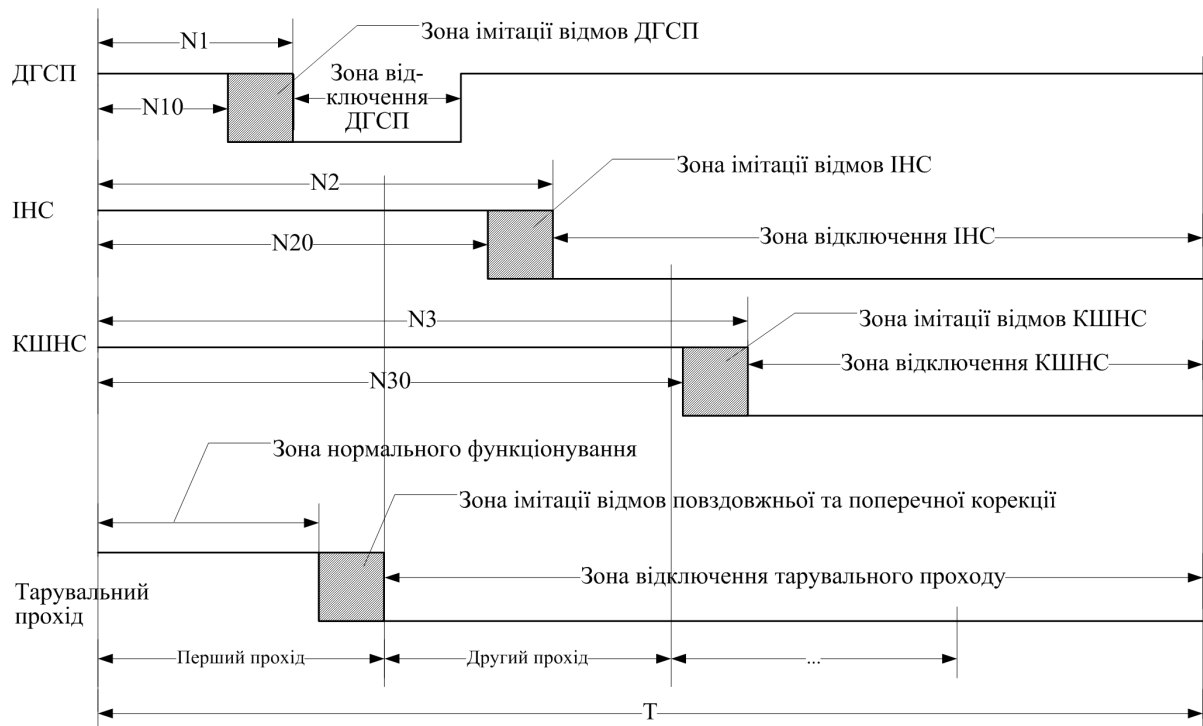


Рисунок 6 – Циклограма підключення та імітації відмов підсистем навігаційного комплексу

При необхідності можливо задати любую бажану комбінацію поведінки підсистем. На рисунку введені такі позначення:  $N1, N10, N2, N20, N3, N30$  - відрізки часу через які закінчується і починається зона імітації відмов відповідно ДГСП, ІНС та КШНС підсистем, причому якщо  $Ni0 > Ni$  ( $i = 1, 2, 3$ ), то відмови в роботі підсистеми не спостерігається. Кожна з величин  $Ni$  та  $Ni0$  дорівнює  $n\Delta t$ , де  $n$  - кількість кроків обчислення моделі, а  $\Delta t$  - крок дискретизації моделі (як зазначено вище, у даному випадку  $\Delta t$  становить 0.1 с). Загальна довжина реалізації визначається періодом  $T$ . Як бачимо, шляхом вибору значень  $N1, N10, N2, N20, N3, N30$  можливо задати такі умови імітаційного моделювання, коли "вийти з ладу" одночасно може одна, дві або всі з задіяних підсистем. Послідовність, кратність та тривалість в часі відмов підсистем також залежить від співвідношення величин  $N1, N10, N2, N20, N3, N30$ .

На рисунку 7 показано процес розрахунку траєкторії руху МТА при порушенні на 15 секунд режиму роботи ДГСП. В результаті цього відбувається збій в роботі навігаційної системи. Варто зазначити, що на протязі 6 секунд (від т. А до т. В) комплекс, за умов роботи інших навігаційних підсистем, підтримує нормальну працездатність, але надалі значення обчислених координат виходять за межі припустимих допусків на бокові відхилення траєкторії руху МТА і відбувається порушення роботи директорного укажчика навігаційної системи. В точці С (рис. 7) відбувається поновлення працездатності ДГСП і через близько 2.5 секунди комплекс переходить в штатний режим обчислення координат.



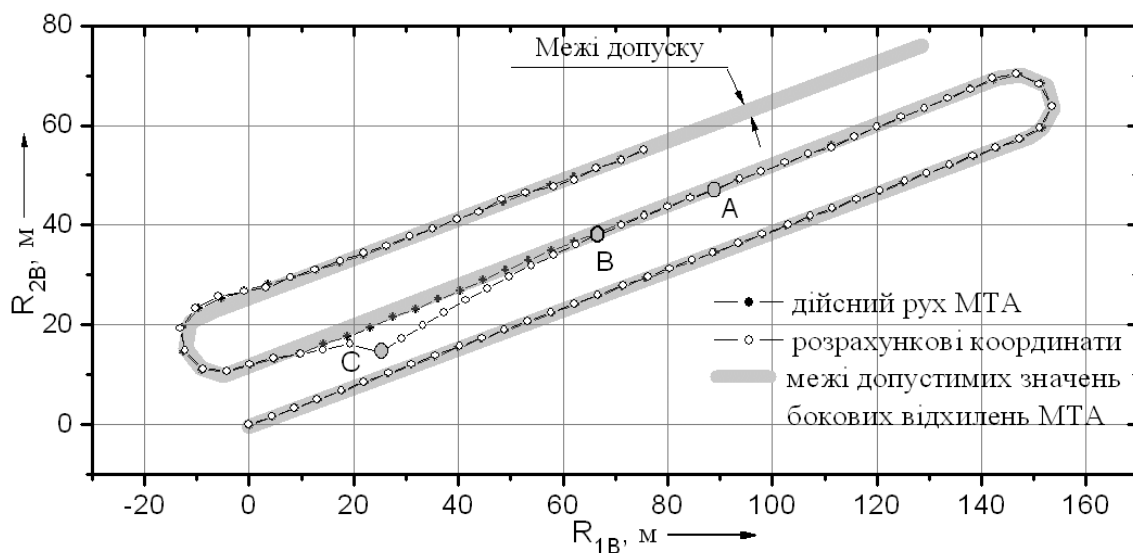


Рисунок 7 – Графік результатів розрахунку траєкторії руху МТА при порушенні на час у 15 секунд режиму роботи ДГСП

При відсутності відмов підсистем, процес обчислення координат в полі відбувається із високим рівнем точності (рис. 8). Середньоквадратичне відхилення бокових коливань МТА склало 0.11 м, в той час як, наприклад, для попереднього випадку цей параметр дорівнює 1.28 м.

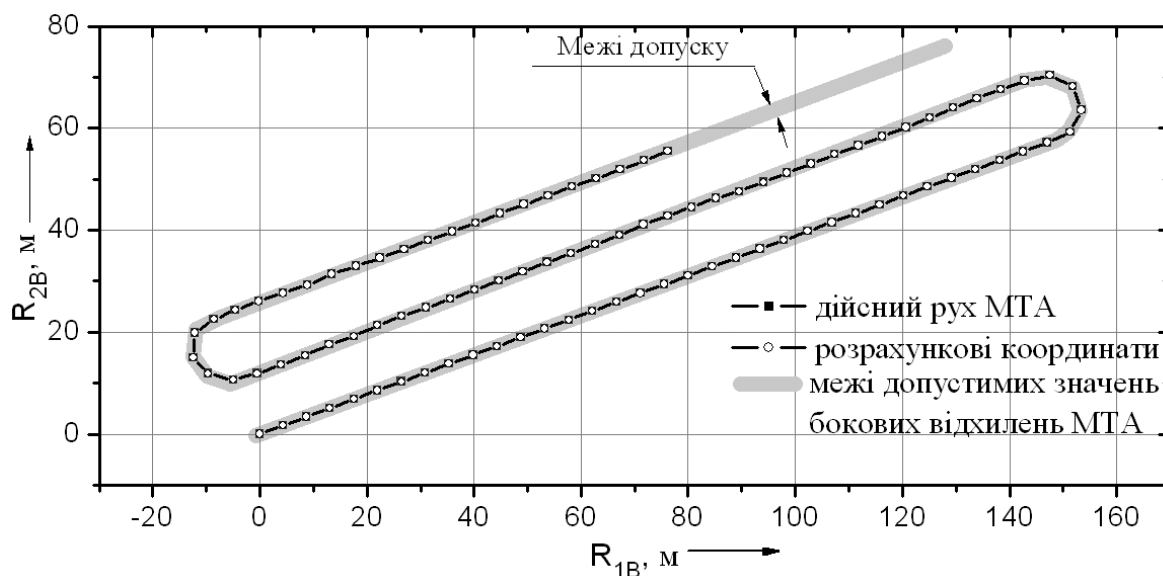


Рисунок 8 – Розраховані координати траєкторії руху МТА при нормальному функціонуванні навігаційних підсистем

Подальший аналіз моделі оцінювання вектора стану системи показав, що відключення процедури ідентифікації відмов КШ та ІН підсистем призводить до швидкого порушення кінематичного режиму руху МТА. Пов'язано це, в першу чергу, з тим, що не всі дані приймають участь в розрахунках координат і, як результат, точність роботи комплексної навігаційної системи погіршується.

Висновки:

1. Підвищити точність обчислення координат МТА в полі і зберегти процес реалізації ЗНВ ТМ в заданих межах при порушенні роботи однієї з навігаційних

підсистем можливо шляхом застосування комплексного навігаційного обладнання та аналізу поведінки підсистем.

2. Наявність в складі комплексної навігаційної системи ІН підсистеми дає можливість описати рух будь-якої з точок сільськогосподарської машини, що необхідно для виконання операцій ЗНВ ТМ з високою просторовою точністю, а також підвищити частоту оновлення даних від комплексної навігаційної системи.

3. Обробку комплексної навігаційної інформації доцільно проводити з використанням процедури калмановської фільтрації "розщепленого" типу з циклічною обробкою компонент вектору спостережень, що дає підвищену усталеність процесу і має порівняно просту реалізацію.

4. Для нормального функціонування комплексних (багатокомпонентних) навігаційних систем обов'язково треба проводити процедуру ідентифікації відмов навігаційних підсистем і відповідні реконфігурації алгоритму обробки навігаційних даних.

## Список література

1. Saunders, S., Larscheid, G., Blackmore, S., Stafford, J. A Method for Direct Comparison of Differential Global Positioning Systems Suitable for Precision Farming, In: Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, eds. P. C. Robert, R. H. Rust, and W. E. Larson, Madison, WI, USA. - 1996. - P. 663-674.
2. Steinmayer, T., Auernhammer, H., Demmel, M. Genauigkeitsanalysen zum einsatz von DGPS bei Feldarbeiten (Accuracy Analysis on DGPS Applications During Fieldwork), Landtechnik 4. – 1999. - P. 212-213.

Проанализированы возможности применения комплексных (многокомпонентных) навигационных систем машинно-тракторных агрегатов для выполнения операций высокоточного дозирования технологических материалов в системе точного земледелия.

The possibilities of complex (multicomponents) navigation aids application on the farm machinery for implementation of operation of high-fidelity dosage of technological materials in the system of precision agriculture are analysed.

*Одержано 20.09.06*